

Ulasan Desain dan Implementasi Simulator Mobil Listrik Berbasis Motor Arus Searah

Adnan Rafi Al Tahtawi

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail: adnan.raf@polban.ac.id

ABSTRAK

Saat ini penelitian terkait kendaraan listrik, khususnya mobil listrik, masih terus dilakukan dalam upaya mengurangi tingkat emisi dari kendaraan bermotor. Beberapa permasalahan yang muncul diantaranya adalah terbatasnya penggunaan baterai, terbatasnya jarak tempuh, dan kesiapan infrastruktur. Dalam skala laboratorium dan pendidikan tinggi, penelitian tentang mobil listrik akan sulit dilakukan jika tidak menggunakan sebuah purwarupa dalam skala kecil. Sebuah simulator mobil listrik berbasis motor arus searah (motor DC) yang saling terhubung sumbu putarnya dapat dirancang untuk mempermudah pengamatan dalam penelitian mobil listrik. Dengan menggunakan asumsi-asumsi yang telah ditentukan, perilaku mobil listrik sebenarnya dapat disimulasikan dengan menggunakan simulator ini. Makalah ini akan mengulas desain dan implementasi simulator mobil listrik berbasis motor arus searah yang telah dirancang dan dikembangkan beberapa tahun terakhir ini. Pemodelan matematis, perancangan perangkat keras, hingga algoritma pengoperasian akan dibahas untuk menunjukkan bahwa simulator ini dapat dimanfaatkan sebagai media penelitian terkait mobil listrik.

Kata Kunci

Simulator, purwarupa, mobil listrik, baterai, motor DC

1. PENDAHULUAN

Mobil listrik merupakan kendaraan yang menggunakan energi listrik sebagai energi penggerakannya. Dengan digunakannya energi listrik sebagai sumber energi bagi kendaraan maka dapat menghemat penggunaan energi fosil dan tentu saja dapat mengurangi polusi yang disebabkan penggunaan energi fosil. Penelitian-penelitian terkait mobil listrik pun masih terus dilakukan. Salah satu permasalahan mobil listrik yang sampai saat ini masih diteliti adalah keterbatasan penggunaan energi listrik yang digunakan, dalam hal ini baterai. Terbatasnya *lifetime* dari baterai berdampak pada terbatasnya jarak tempuh. Hal ini tentu saja menjadi kelemahan bagi mobil listrik jika dibandingkan dengan mobil konvensional lain.

Berbagai metode telah dirancang untuk mengatasi permasalahan tersebut, seperti penggunaan metode kendali hibrida baterai, superkapasitor, dan *fuel cell* berbasis prediksi model [1]-[2]. Sumber energi listrik tambahan dapat dimanfaatkan untuk memperpanjang *lifetime* baterai. Seperti contoh, dengan hanya menambahkan energi superkapasitor, maka energi baterai dapat direduksi 23,23% [3]. Komponen ini

memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan jenis kapasitor lainnya. Superkapasitor memiliki kapasitansi yang lebih besar, sehingga dapat menyimpan muatan listrik lebih besar pula. Jika dibandingkan dengan baterai, superkapasitor memiliki waktu pengisian dan pengosongan yang lebih cepat. Sistem pengendalian energi hibrida ini juga dapat dirancang dengan menggunakan metode logika fuzzy [4]-[5].

Salah satu permasalahan yang muncul dalam melakukan penelitian mobil listrik adalah perlunya biaya yang besar dalam membuat mobil listrik. Metode yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan memanfaatkan motor arus searah (DC) sebagai perangkat simulasi. Dua buah motor DC yang dihubungkan pada sumbu putarnya dapat disimulasikan sebagai interaksi mobil listrik dengan beban yang diterimanya. Konsep ini telah dikembangkan pada suatu penelitian dimana sebuah simulator mobil listrik dirancang dan diberi nama Protodrive seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [6]-[8]. Simulator ini dapat mensimulasikan perilaku mobil listrik sebenarnya dengan menggunakan dua buah motor DC yang saling terhubung. Motor DC

1 merepresentasikan mobil listrik, sedangkan motor DC 2 merepresentasikan profil perjalanan seperti kontur jalan, kondisi angin, maupun jumlah penumpang. Dengan simulator ini, penelitian mobil listrik dapat dilakukan dalam skala kecil.



Gambar 1. Protodrive: simulator mobil listrik [6]-[8]

Pada penelitian selanjutnya, simulator ini juga telah dikembangkan untuk mengamati skema pengisian superkapasitor untuk berbagai profil kontur jalan. Dengan menggunakan teknik yang sama, dimana digunakan dua buah motor DC yang terhubung sumbu putarnya, besarnya arus pengisian superkapasitor dapat diamati. Hasilnya menunjukkan bahwa besarnya arus pengisian berbanding lurus dengan tingkat kemiringan permukaan jalan saat pengereman regeneratif [9]-[10]. Selain itu, pengembangan juga dilakukan dalam perancangan pengendali kecepatan dan torsi untuk kedua motor DC tersebut dengan metode kendali Proportional Integral Anti-Windup (PI-AW) [11]. Pemodelan perangkat lunak berbasis MATLAB/Simulink juga dilakukan sebagai metode simulasi untuk mempermudah proses analisis [12]. Berbagai metodologi pengembangan lainnya, khususnya dalam pengendalian kecepatan dan torsi untuk motor DC pada simulator mobil listrik juga telah dilakukan. Seperti pada [13] yang merancang pengendali prediksi model (MPC) dan [14] yang merancang pengendali modus luncur untuk kendali kecepatan motor DC. Kendali torsi juga dirancang sebagai pembebanan mobil listrik dengan mengintegrasikan model baterai pada model mobil listrik [15].

Makalah ini bertujuan untuk mengulas desain dan implementasi simulator mobil listrik yang memiliki banyak sekali manfaat, khususnya dalam penelitian tentang mobil

listrik. Simulator ini dibuat dengan menggunakan motor DC sebagai perangkat utamanya. Simulator berbasis motor arus searah tanpa sikat (BLDC) sebenarnya juga dapat dimanfaatkan. Namun, dengan menggunakan motor BLDC akan lebih kompleks dalam proses perancangannya. Ulasan yang dibahas pada makalah ini terdiri dari pemodelan sistem, perancangan sistem, dan implementasi sistem dengan merujuk pada berbagai penelitian terkait sebelumnya terkait simulator mobil listrik.

2. PEMODELAN SISTEM

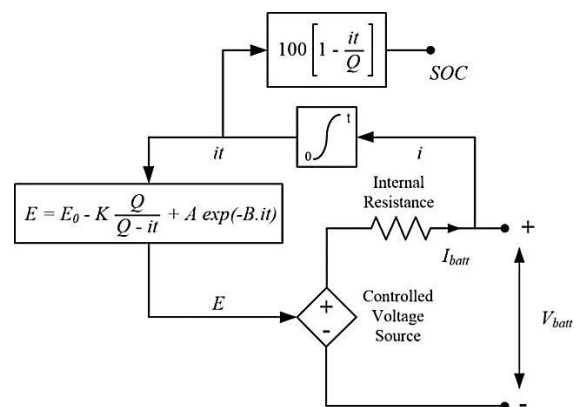
2.1 Model Baterai

Model baterai yang digunakan terdiri dari sumber tegangan variabel dan resistansi internal yang tersusun seri. Besarnya nilai yang mengatur sumber tegangan variabel dan tegangan baterai diperoleh berdasarkan [16] sebagai berikut:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

$$V_{batt} = E - Ri \quad (2)$$

dengan E adalah tegangan variabel, E_0 adalah tegangan konstan baterai, K adalah tegangan polar, Q adalah kapasitas baterai, A adalah amplitudo daerah eksponensial, B adalah invers konstanta waktu daerah eksponensial. V_{batt} adalah tegangan aktual baterai, R adalah resistansi dan i adalah arus. Model yang digunakan dengan menambahkan variabel *State of Charge* (SOC) adalah seperti Gambar 2.

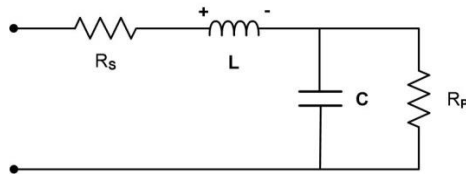


Gambar 2. Model baterai [16]

2.2 Model Superkapasitor

Superkapasitor dapat dimodelkan dengan sebuah kapasitor (C) yang ditambahkan

resistansi seri (R_s), induktansi seri (L) dan resistansi paralel (R_p). Model superkapasitor yang dirancang adalah seperti Gambar 3.



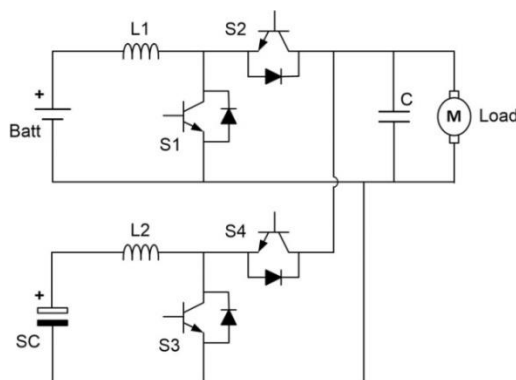
Gambar 3. Model superkapasitor [12]

Nilai C dan L bergantung pada setiap jenis konstruksi superkapasitor. R_s merupakan resistansi internal yang menyebabkan tegangan jatuh saat pengisian-pengosongan muatan. R_p merupakan resistansi yang menyebabkan adanya *self-discharge* pada superkapasitor. Variabel SOC pada model superkapasitor ini didefinisikan sebagai berikut:

$$SOC(\%) = \frac{V_{out}}{V_{max}} \times 100 \quad (3)$$

2.3 Model Konverter DC/DC

Model konverter DC/DC dirancang agar skema kendali arus dapat diterapkan. Konverter yang digunakan bersifat dua arah (*bidirectional*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model konverter DC/DC [12]

Konverter ini bekerja dengan cara mengatur pensaklaran pada transistor S1-S4. Proses tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Terdapat dua mode pada konverter tipe ini, yaitu mode *boost* dan mode *buck*. Mode *boost* bekerja dengan cara mengatur pensaklaran pada S1 dan S3. Ketika saklar ON, maka induktor (L) akan menyimpan arus dan seketika arus tersebut dialirkan menuju kapasitor ketika saklar OFF sehingga akan menghasilkan tegangan *output*

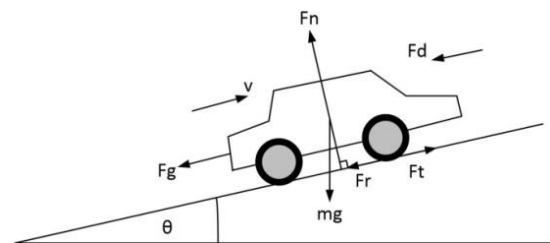
yang lebih besar. Mode *buck* bekerja dengan cara mengatur pensaklaran pada S2 dan S4. Ketika saklar ON, maka arus akan dialirkan dari motor menuju baterai dan arus tersebut akan melewati dioda pada S1 dan S3 ketika saklar S2 dan S4 OFF.

2.4 Model Dinamik Kendaraan

Diagram interaksi gaya pada mobil saat bergerak ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan diagram tersebut, besarnya perubahan kecepatan mobil saat melintas dipermukaan jalan adalah [17]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{tr}}{\delta m_v} \quad (4)$$

dimana $\frac{dv}{dt}$ adalah perubahan kecepatan terhadap waktu (percepatan), $\sum F_t$ adalah total gaya traksi kendaraan, $\sum F_{tr}$ adalah total gaya resistif, δ adalah faktor massa dan m_v adalah total massa kendaraan.



Gambar 5. Diagram interaksi gaya kendaraan [12]

Gaya resistif kendaraan terdiri dari gaya resistif putaran roda (F_r), gaya aerodinamis (F_d) dan gaya gravitasi (F_g). Ketiga gaya tersebut diperoleh berdasarkan persamaan berikut:

$$F_r = \text{sign}(v) C_r m_v g \cos(\theta) \quad (5)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \text{sign}(v + v_w^2) \rho_a A_f C_d (v + v_w^2) \quad (6)$$

$$F_g = m_v g \sin(\theta) \quad (7)$$

dimana v adalah kecepatan, v_w adalah kecepatan angin, m_v adalah massa kendaraan, g adalah percepatan gravitasi, θ adalah sudut kemiringan jalan, ρ_a massa jenis udara, C_r dan C_d berturut-turut adalah koefisien resistansi roda dan aerodinamis, terakhir A_f adalah luas area depan kendaraan. Dengan demikian total gaya traksi yang diperlukan dapat ditulis:

$$F_t = \delta m_v \frac{dv}{dt} + \text{sign}(v) C_r m_v g \cos(\theta) + \frac{1}{2} \text{sign}(v) + v_w^2 \rho_a A_f C_d (v + v_w^2) + m_v g \sin(\theta) \quad (8)$$

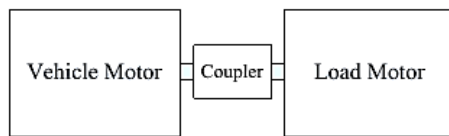
Berdasarkan persamaan tersebut maka dapat dihitung besarnya torsi yang diperlukan roda sebagai berikut:

$$T = F_t r \quad (9)$$

dimana T adalah torsi dan r adalah jari-jari roda.

2.5 Model Simulator Mobil Listrik

Interaksi antara roda mobil dengan permukaan jalan dapat dimodelkan dengan dua buah motor DC yang saling terhubung sumbu putarnya seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Motor DC 1 diasumsikan sebagai kendaraan (mobil) sedangkan motor DC 2 diasumsikan sebagai profil beban. Karena model yang digunakan adalah motor DC, maka diperlukan perhitungan tegangan masukan motor DC yang mampu merepresentasikan kondisi interaksi sebenarnya antara mobil dan permukaan jalan.



Gambar 6. Dua unit motor DC terhubung [7]

Berdasarkan konfigurasi ini, maka persamaan elektrik motor DC dapat ditulis:

$$V_{in} = Ri + L \frac{di}{dt} + V_{bemf} \quad (10)$$

dimana V_{in} adalah tegangan masukan motor DC, R dan L berturut-turut adalah resistansi dan induktansi, i adalah arus dan V_{bemf} adalah tegangan yang disebabkan gaya balik elektromotif, sedangkan persamaan mekanik motor DC ketika terhubung sumbu putar dengan motor DC lain adalah:

$$T_{M1} + T_{M2} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

dimana T_{M1} dan T_{M2} adalah torsi motor DC 1 dan motor DC 2, J adalah momen inersia dan $\frac{d\omega}{dt}$ adalah percepatan sudut. Dengan menggunakan hubungan:

$$V_{bemf} = k\omega \quad (12)$$

dan

$$i = \frac{T}{k} \quad (13)$$

dimana k adalah konstanta motor dan ω adalah kecepatan sudut, maka persamaan elektrik dan mekanis kedua motor DC adalah

$$V_{M1} = R \frac{T_{M1}}{k} + k\omega \quad (14)$$

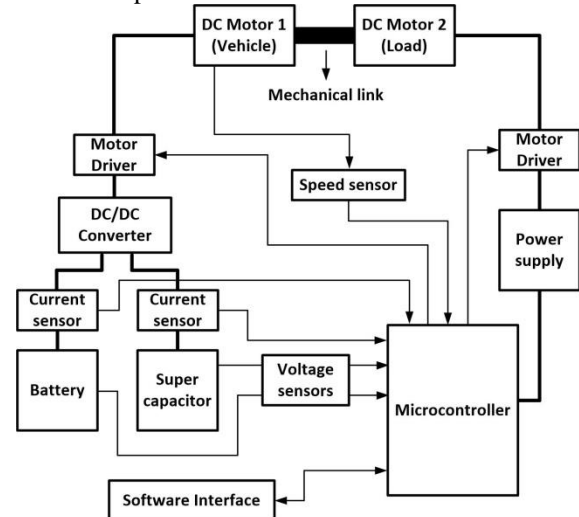
$$V_{M2} = R \frac{J \frac{d\omega}{dt} - T_{M1}}{k} + k\omega \quad (15)$$

dimana V_{M1} dan V_{M2} adalah tegangan masukan kedua motor DC.

3. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perangkat Keras

Secara umum, diagram blok perangkat keras simulator mobil listrik ditunjukkan pada Gambar 7. Diagram ini dirangkum berdasarkan beberapa referensi sebelumnya untuk kesederhanaan. Pengembangan dari diagram ini dapat dilakukan sesuai dengan kebutuhan proses simulasi.



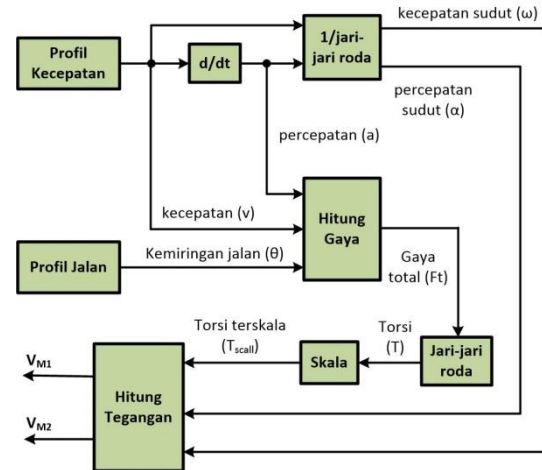
Gambar 7. Diagram blok perangkat keras

Perangkat keras simulator mobil listrik dapat dibangun menggunakan dua unit motor DC, mikrokontroler, baterai, superkapasitor, sensor arus, sensor tegangan, sensor kecepatan, konverter DC/DC, driver motor DC, catu daya, dan komputer antarmuka. Motor DC yang digunakan dapat menggunakan tegangan maksimum 12 V dengan sumbu putar yang saling terhubung. Mikrokontroler berfungsi sebagai perangkat komputasi dan sebagai penghubung antara perangkat antarmuka dan perangkat keras.

Pada penelitian sebelumnya, jenis mikrokontroler yang digunakan diantaranya adalah mBed LPC1768 dan Arduino Mega 2560. Penggunaan jenis mikrokontroler ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan seperti kecepatan komputasi, jumlah pin, dan kecepatan transfer data. Untuk baterai yang digunakan adalah baterai Lithium-Ionium (Li-Ion) dengan tegangan 3,7 V sebanyak tiga sampai empat unit sehingga menghasilkan tegangan 11,1 V – 14,8 V. Sebagai sumber energi tambahan, superkapasitor juga digunakan dengan nilai 2,7V/100F atau dapat menyesuaikan dengan tegangan baterai. Kedua sumber energi tersebut selanjutnya diamati arus dan tegangannya menggunakan sensor arus dan tegangan yang terhubung ke mikrokontroler. Sensor kecepatan juga digunakan untuk mengamati kecepatan motor DC 1 yang merepresentasikan mobil listrik. Untuk mengendalikan besarnya arus yang dibutuhkan motor DC, maka digunakan konverter DC/DC. Konverter tipe *boost* diaktifkan saat terjadi proses *discharging*, sedangkan konverter tipe *buck* diaktifkan saat terjadi proses *charging*. Pengendalian konverter ini dilakukan menggunakan pensaklaran dari mikrokontroler maupun sinyal PWM. Motor DC yang digunakan juga terhubung dengan *driver* yang berfungsi untuk mengatur arah dan kecepatan motor DC. Jika tersedia, dapat juga menggunakan *driver* motor DC yang telah terintegrasi modul konverter DC/DC. Sistem perangkat keras ini juga menggunakan catu daya sebagai sumber daya motor DC 2. Penggunaan baterai Li-Ion juga dapat digunakan untuk motor DC 2 seperti halnya motor DC 1. Sebagai perangkat antarmuka pengguna, MATLAB dapat dimanfaatkan yang dapat dibangun menggunakan fasilitas GUI.

3.2 Perancangan Profil Kecepatan dan Beban

Simulator ini memiliki dua masukan yaitu profil kecepatan dan profil beban. Profil kecepatan dan beban ini dihitung berdasarkan persamaan matematika yang telah dibahas pada bagian sebelumnya. Setelah melalui perhitungan, kedua profil ini selanjutnya akan menghasilkan bentuk tegangan untuk masing-masing motor DC. Adapun diagram proses perhitungannya dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Perancangan profil kecepatan dan beban

Untuk merancang profil kecepatan dapat digunakan persamaan konstan, linier, sinusoidal, maupun dari profil kecepatan khusus. Persamaan ini dapat dibuat menggunakan M-file MATLAB. Untuk merancang profil beban juga digunakan persamaan matematis yang merepresentasikan kontur jalan. Dari persamaan tersebut kemudian dapat dihitung kemiringan profil jalan menggunakan metode gradien. Seperti contoh untuk membuat profil jalan berbukit dapat digunakan persamaan sinusoidal berikut.

$$f(t) = h \sin(\omega t + \phi) + n \quad (16)$$

dimana h adalah ketinggian bukit (m), ω merupakan panjang bukit (m), ϕ merupakan pergeseran horizontal (m), dan n merupakan pergeseran vertikal (m). Untuk menghitung gradien dari profil tersebut, dapat digunakan persamaan

$$\delta(x) = \frac{dh(x)}{dx} \quad (17)$$

dengan $\delta(x)$ adalah gradien terhadap sumbu x , $h(x)$ merupakan ketinggian dari bukit. Persamaan gradien ini selanjutnya diubah ke dalam domain waktu agar dapat disimulasikan. Kemiringan lintasan terhadap waktu diperoleh dengan cara mensubstitusikan fungsi jarak terhadap waktu $x(t)$ ke fungsi ketinggian terhadap jarak $h(x)$ sebagai berikut.

$$x(t) \rightarrow h(x) = h(t) \quad (18)$$

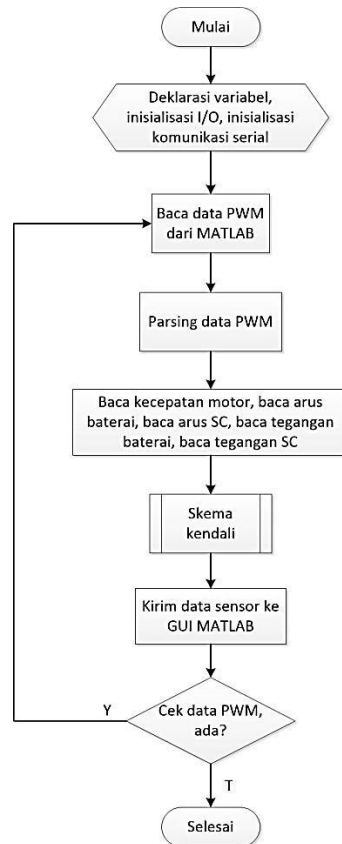
Dengan demikian, kemiringan $\delta(t)$ dan sudutnya terhadap waktu $\theta(t)$ dapat diperoleh sebagai berikut.

$$\delta(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (19)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{\delta(t)}{dt} \quad (20)$$

3.3 Algoritma Simulasi

Adapun diagram alir simulasi dari sistem ini dapat dilihat pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Diagram alir simulasi

3.4 Sistem Kendali

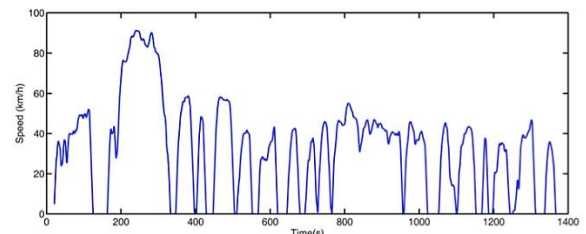
Sistem kendali yang dapat diterapkan pada simulator mobil listrik ini diantaranya sistem kendali baterai-superkapasitor, sistem kendali kecepatan kendaraan, dan sistem kendali torsi beban. Sistem kendali baterai-superkapasitor dapat dirancang untuk mengatur besarnya arus baterai maupun superkapasitor yang dibutuhkan selama mobil melakukan perjalanan. Adapun jenis kendali yang dapat dirancang seperti MPC [1]-[2], maupun FLC [4]-[5]. Untuk kesederhanaan, algoritma kendali ON/OFF juga dapat dirancang. Jika arus beban yang dibutuhkan tinggi dan tegangan superkapasitor cukup, maka gunakan superkapasitor. Selain itu, gunakan baterai sebagai sumber energi. Kelebihan dan kekurangan dari beberapa metode kendali ini

dapat dikaji lebih lanjut. Sistem kendali motor DC juga dapat dirancang untuk mengendalikan kecepatan motor DC 1 dan torsi motor DC 2 [11]. Metode kendali ini bertujuan untuk mengendalikan kecepatan dan torsi agar sesuai dengan hasil perhitungan dan kebutuhan. Jenis pengendalian dapat menggunakan pengendali PID dan berbagai konfigurasinya.

4. IMPLEMENTASI SISTEM

4.1 Pembuatan Profil Kecepatan dan Beban

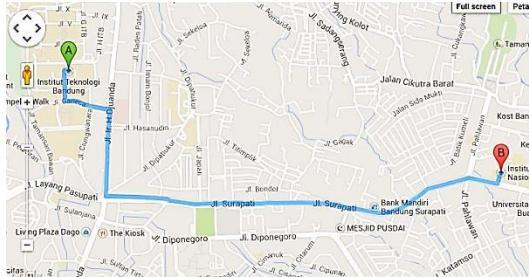
Simulasi diawali dengan membuat profil kecepatan dan beban pada MATLAB sebagai masukan. Profil kecepatan dapat dibuat berupa kecepatan konstan atau berubah. Profil kecepatan khusus seperti profil *Environmental Protection Agency* (EPA) juga dapat dijadikan sebagai masukan seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Kecepatan konstan dapat dibuat menggunakan persamaan konstan yang memiliki percepatan nol, sedangkan kecepatan berubah dapat dibuat menggunakan persamaan linier parsial maupun persamaan eksponensial. Profil kecepatan ini selanjutnya digunakan sebagai masukan simulator dan besarnya konsumsi arus beban dapat diamati.



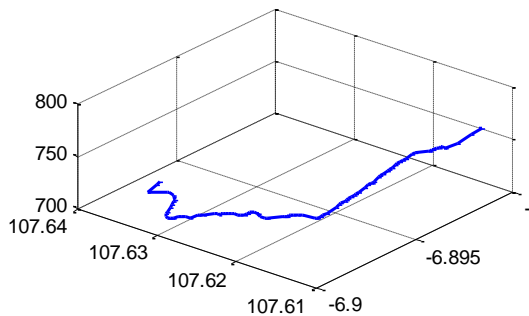
Gambar 10. Profil kecepatan EPA [18]

Untuk pembuatan profil beban, penggunaan persamaan matematika juga dilakukan seperti pada pembuatan profil kecepatan. Profil beban dapat dibuat berupa jalan menanjak, datar, dan menurun. Untuk kebutuhan simulasi, jalan berbelok dapat diabaikan. Profil beban juga dapat dibuat menggunakan Google Maps dengan cara mengambil koordinat kontur dari satu titik ke titik lainnya. Seperti contoh pada Gambar 11 ditunjukkan rute jalan dari kampus ITB ke kampus ITENAS dengan perubahan kontur kemiringan jalan pada Gambar 12 dan sudut kemiringannya pada Gambar 13. Pada profil beban, data yang dibutuhkan adalah

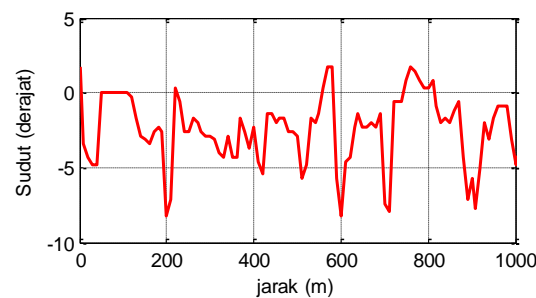
kemiringan jalan yang dapat dihitung menggunakan persamaan (17) sampai (20). Kemiringan jalan akan menentukan besarnya beban arus yang dibutuhkan oleh kendaraan listrik.



Gambar 11. Profil perjalanan dari Google Maps



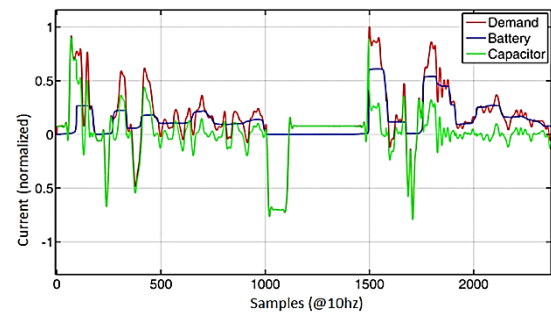
Gambar 12. Profil kontur kemiringan jalan



Gambar 13. Profil sudut kemiringan jalan

4.2 Pengujian Konsumsi Sumber Energi

Setelah dilakukan perancangan dan pembuatan profil kecepatan dan beban, maka besarnya tegangan untuk kedua motor DC dapat dihasilkan melalui persamaan (14) dan (15). Kedua tegangan inilah yang kemudian dikonversi ke dalam bentuk PWM untuk menggerakkan kedua motor DC. Jika kedua motor DC sudah dioperasikan dengan masing-masing masukan tegangannya, maka besarnya konsumsi arus baterai maupun superkapasitor dapat diamati seperti diilustrasikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Perbandingan konsumsi arus [19]

Penggunaan baterai dan superkapasitor dapat dikendalikan sesuai kebutuhan. Sistem kendali sumber energi hibrida ini dapat dirancang dari yang bersifat sederhana hingga kompleks. Tujuan utama pengendalian sumber energi ini adalah untuk memperpanjang waktu hidup baterai. Dengan demikian sebisa mungkin superkapasitor harus berperan saat arus beban yang dibutuhkan besar. Untuk lebih jelasnya, algoritma pengendalian dasar yang paling sederhana adalah sebagai berikut:

1. Jika kendaraan melewati jalan menanjak dan superkapasitor memiliki tegangan, maka gunakan superkapasitor.
2. Jika kendaraan melewati jalan menurun, maka isi muatan superkapasitor.
3. Untuk kondisi lainnya, gunakan baterai.

Dengan adanya superkapasitor, maka penggunaan baterai dapat diminimalisir khususnya pada saat kendaraan membutuhkan torsi yang besar. Algoritma kendali yang lebih kompleks juga dapat dirancang seperti kendali MPC maupun FLC. Lebih lanjut lagi, pengendalian sumber energi ini juga dapat diintegrasikan dengan informasi lalu lintas yang diperoleh dari Google Maps. Dengan informasi tersebut, penggunaan baterai dan superkapasitor dapat dioptimasi menggunakan metode kendali optimal yang memanfaatkan fungsi konstrain.

4.3 Diskusi

Simulator mobil listrik dalam skala kecil dapat dimanfaatkan dengan tujuan untuk kebutuhan penelitian dalam skala kecil di laboratorium pendidikan. Dengan menggunakan simulator ini, kita dapat mengamati berbagai aspek yang perlu diteliti tentang mobil listrik dengan mudah tanpa harus berinteraksi dengan mobil listrik sebenarnya. Tentu saja dibutuhkan asumsi-asumsi sehingga simulator ini dapat dianggap

memiliki kriteria yang sama dengan kondisi aktual. Dalam pengembangannya, Protodrive merupakan produk simulator mobil listrik pertama yang dikembangkan oleh University of Pennsylvania [3], [6]-[8], [19]. Kemudian simulator ini dibuat ulang dengan jenis komponen yang berbeda seperti pada [9], [10]. Artinya, simulator ini dapat dikembangkan oleh siapa saja yang memiliki ketertarikan penelitian di bidang mobil listrik.

5. KESIMPULAN

Desain dan implementasi simulator kendaraan listrik berbasis motor arus searah telah diulas pada makalah ini. Simulator ini dapat dibangun menggunakan dua buah motor DC yang saling terhubung sumbu putarnya. Dengan simulator ini, penelitian terkait mobil listrik, seperti penelitian mengenai penggunaan sumber energi baterai-superkapasitor dapat dilakukan dalam skala kecil. Besarnya konsumsi arus baterai maupun superkapasitor dapat diamati untuk setiap profil kecepatan dan profil perjalanan yang ditentukan. Algoritma pengendalian baterai dan superkapasitor juga dapat dirancang untuk mengoptimasi penggunaan arus. Dengan demikian, simulator ini dapat memberikan kontribusi dalam penelitian terkait mobil listrik khususnya dalam skala laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amin, B. R. Trilaksono, A. S. Rohman, C. J. Dronkers, R. Ortega, A. Sasongko, "Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Sources using Model Predictive Control," *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1992-2002, Nov. 2014.
- [2] Amin, B. R. Trilaksono, A. Sasongko, A. S. Rohman, C. J. Dronkers and R. Ortega, "Model Predictive Control of hybrid fuel cell/battery/supercapacitor power sources," *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Bandung, 2012, pp. 1-6.
- [3] A. Mulya, Y. V. Pant, R. Mangharam, "Protodrive: Rapid Prototyping Platform for Electric Vehicle Powertrain", 2012.
- [4] P. Aiswarya and A. Abraham, "Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Power System Control," *Proc. of the Intr. Conf. on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering*, pp. 41-45, 2012.
- [5] M. Michalczuk, B. Ufnalski and L. Grzesiak, "Fuzzy logic control of a hybrid battery-ultracapacitor energy storage for an urban electric vehicle," *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, 2013, pp. 1-7.
- [6] W. Price and A. Botelho, "Protodrive: Rapid prototyping and simulation for EV powertrains". University of Pennsylvania, 2012.
- [7] S. Diaz, "Protodrive: Simulation of Electric Vehicle Powertrains," NSF Summer Undergraduate Fellowship in Sensor Technologies, Binghamton University, 2012.
- [8] S. Diaz, H. Jain, Y. Pant, W. Price, and R. Mangharam, "Protodrive: An Experimental Platform for Electric Vehicle Energy Scheduling and Control," Dept. Electrical and System Engineering, University of Pennsylvania, 2012.
- [9] A. R. Al Tahtawi and A. S. Rohman, "Simple Supercapacitor Charging Scheme in Electric Car Simulator by Using Direct Current Machines," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bali, 2015, pp. 562-567.
- [10] A. R. Al Tahtawi, A. S. Rohman, "Simple Supercapacitor Charging Scheme of an Electric Vehicle on Small-Scale Hardware Simulator: A Prototype Development for Education Purpose," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology (MEV)*, vol. 7, no. 2, pp. 77-86, Dec. 2016.
- [11] A. R. Al Tahtawi and A. S. Rohman, "Perancangan Pengendali Proporsional-Integral Anti-Windup pada Simulator Mobil Listrik untuk Kendali Kecepatan dan Torsi," *Jurnal Teknik Elektro, Komputer, dan Informatika (ELECTRANS)*, vol. 14, no. 1, pp. 1-7, Maret 2016.
- [12] A. R. Al Tahtawi, "Pemodelan dan Simulasi Kendaraan Listrik Berbasis Motor Arus Searah pada MATLAB/Simulink," *Jurnal Informatika, Sistem Kendali, dan Komputer (INKOM)*, vol. 10, no. 2, pp. 75-80, Nov. 2016.
- [13] H. F. Prasetyo, A. S. Rohman, H. Hindersah and M. R. A. R. Santabudi, "Implementation of Model Predictive Control (MPC) in electric vehicle testing simulator," *2017 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, Sanur, 2017, pp. 48-54.
- [14] M. R. A. R. Santabudi, A. S. Rohman, H. Hindersah and H. F. Prasetyo, "Implementation of sliding mode control using modification of two-steps LMI approach for speed control of electric vehicle simulator," *2017 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, Sanur, 2017, pp. 42-47.
- [15] R. Ristiana, H. Hindersah, A. S. Rohman, C. Machbub, A. Purwadi and E. Rijanto, "Torque control using integrated battery-

- electric vehicle model with flexible shaft,”
2017 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Sanur, 2017, pp. 24-29.
- [16] O. Tremblay, L. Dessaint and A. Dekkiche, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Arlington, TX, 2007, pp. 284-289.
- [17] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory and Design*, ISBN: 0-8493-3154-4, CRC Press LCC, 2004.
- [18] U.S. Environmental Protection Agency, “Federal Test Procedure Revisions,” <http://www.epa.gov/oms/sftp.htm>
- [19] W. Price, “Protodrive”, <http://protodrive.blogspot.com/>